

## 三种观赏植物对重金属镉的耐性与积累特性

燕傲蕾<sup>1</sup>, 吴亭亭<sup>1</sup>, 王友保<sup>1,2,\*</sup>, 张旭情<sup>1</sup>

(1. 安徽师范大学生命科学学院, 芜湖 241000; 2. 安徽师范大学生物环境与生态安全安徽省高校省级重点实验室, 芜湖 241000)

**摘要:**通过盆栽实验,对镉(Cd)胁迫下3种观赏植物含羞草、白雪姬和树马齿苋的生长、生理和重金属累积与分布情况进行了研究。结果表明:含羞草、白雪姬和树马齿苋的平均耐性指数分别为105.57、81.35和79.88;在100mg·kg<sup>-1</sup>Cd浓度下三者叶绿素a、b的含量分别为对照的83.74%、69.83%、60.64%、51.26%和60.64%、51.26%;类胡萝卜素的含量和叶绿素a/b值无明显变化;三者在Cd胁迫下均表现出O<sub>2</sub><sup>-</sup>离子生成速度上升,MDA含量增加,电导率升高的趋势,其中含羞草的变化幅度最低,白雪姬次之,树马齿苋最高。三者对Cd的耐性表现为含羞草>白雪姬>树马齿苋。3种观赏植物对Cd均具有较强累积能力,在土壤Cd含量为100mg·kg<sup>-1</sup>时,三者根和地上部分的Cd累积浓度均高于100mg·kg<sup>-1</sup>。且对Cd累积能力为树马齿苋>含羞草>白雪姬。含羞草、白雪姬和树马齿苋在土壤Cd污染的治理中有一定的应用价值。

**关键词:**Cd;观赏植物;耐性;积累特性

## The characteristics of cadmium tolerance and accumulation in three kinds of ornamental plants

YAN Aolei<sup>1</sup>, WU Tingting<sup>1</sup>, WANG Youbao<sup>1,2,\*</sup>, ZHANG Xuqing<sup>1</sup>

<sup>1</sup> College of Life Sciences, Anhui Normal University, Wuhu 241000, China

<sup>2</sup> Provincial Key Laboratory of Biotic Environment and Ecological Safety in Anhui, Wuhu 241000, China

**Abstract:** Because of the economical and biological benefits, ornamental plant has become a new source for phytoremediation in recent years. In this study, three kinds of ornamental plants, *Mimosa pudica*, *Tradescantia sillamontana* and *Portulaca afra* were tested under five cadmium (Cd) application rate levels that range from 0mg·kg<sup>-1</sup> to 100mg·kg<sup>-1</sup> by pot-planting method. The growth indexes, physiological indexes and the Cd accumulation in them were studied after a growing period of 50 days. The results showed that Cd had distinct inhibition on the growth of plant, the average tolerance index of *M. pudica*, *T. sillamontana* and *P. afra* were 105.57, 81.35 and 79.88 separately, and the most growth indexes of them had significant differences with the control group in Cd concentration of 50mg·kg<sup>-1</sup>. The physiological indexes were also influenced by Cd stress obviously, in the content of photosynthetic pigment tested, chlorophyll a contents of *M. pudica*, *T. sillamontana* and *P. afra* were 83.74%, 60.64% and 60.64% separately, compared with the control group, while chlorophyll b contents of them were only 69.83%, 51.26% and 51.26% of the control, but both the contents of carotenoid and chlorophyll a/b values of them were not obviously changed, some of them even raised with the increased Cd concentration, these indicated that Cd do more damage to chlorophyll than to carotenoid, and chlorophyll b was the most sensitive one to Cd pollution in them. For the balance of superoxide system was destroyed under Cd stress, with the rise of Cd, the production rate of superoxide in *M. pudica*, *T. sillamontana* and *P. afra* were all increased, which lead to the accumulation of superoxide and the rise of the MDA contents in three ornamental plants, meanwhile, as a result of the destroyed cell membrane, the selective permeability of cells declined and the electrical conductivity of them were all moved up significantly, the production rate of superoxide, the contents of MDA and electrical

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(30470270);安徽省高校自然科学基金重点资助项目(KJ2009A104);重要生物资源保护与利用研究安徽省重点实验室基金资助项目

**收稿日期:**2009-10-16; **修订日期:**2010-01-05

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wybzl@tom.com

conductivity were all correlated well with the Cd added concentration, and the variation range of *M. pudica* was the smallest, while *P. afra* was the highest among them. Forming the effects on the growth indexes and physiological indexes, we could found that the tolerance of Cd was *M. pudica* > *T. sillamontana* > *P. afra*. The accumulation and distribution of heavy metals in plant were also important indexes in choosing patient species. In our study, with the rise of the Cd the accumulation of Cd in both the root and the above ground parts of ornamental plants tested were all increased; *P. afra* had the highest accumulation in them as the Cd concentration in its root and the above ground parts reaching  $612.37 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  and  $259.47 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  separately in  $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , but the transform ability of Cd in *T. sillamontana* was the strongest under high Cd stress as the translocation factor of it were all above 0.6 from  $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  to  $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ . The Cd concentration in these ornamental plants were all above  $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  when the add-concentration of Cd reached  $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  and the accumulation ability was *P. afra* > *M. pudica* > *T. sillamontana*. From the discussion above, we can reach a conclusion that *M. pudica*, *T. sillamontana* and *P. afra* all have high tolerance and strong accumulate ability to Cd, so they all have certain applied value in the treatment of Cd polluted areas.

**Key Words:** cadmium; ornamental plant; tolerance; accumulation

Cd 是一种对环境危害大且生物非必需的元素, 在环境中具有化学活性强、移动性大、生物毒性强且持久的特性, 易被植物吸收, 能在植物体内残留对植物产生毒害, 并通过食物链的富集危及人类健康<sup>[1-2]</sup>。随着工业化的迅速发展, 人类活动加速了 Cd 的地球化学循环进程, 导致 Cd 向环境中释放的速度加快, 使人类生活环境中 Cd 的总量提高, 土壤 Cd 污染日益严重, 土壤镉污染的治理已相当紧迫<sup>[3-5]</sup>。近年来, 植物修复技术以其安全、廉价等众多优点成为学术界研究的热点<sup>[6]</sup>, 但是已经发现的超富集植物一般生物量小, 生长缓慢, 重金属迁移总量相对不高。而在自然环境中存在一些对重金属耐性较强的植物, 虽然其体内重金属含量达不到超积累植物的定义, 但其重金属迁移总量仍较可观, 这些植物对重金属污染地的修复作用不可忽视<sup>[7]</sup>。因此, 继续筛选植物修复物种具有十分重要的意义。

观赏植物经济效益十分明显, 并且生长一段时间后会整株移出, 植物主要积累重金属的部位根不会留在土壤造成二次污染, 也不会进入食物链危及人类的健康。同时, 一些生长较快生物量较大的耐性观赏植物也有较好的修复效果。本文通过研究了 3 种观赏植物含羞草、白雪姬和树马齿苋在重金属 Cd 胁迫下的生理生化反应及对 Cd 的积累情况, 研究其对 Cd 的耐受与积累特性, 探索其在 Cd 污染土壤修复中应用的可行性。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料与设计

豆科含羞草属含羞草 (*M. pudica*)、鸭跖草科鸭跖草属白雪姬 (*T. sillamontana*) 和马齿苋科马齿苋树属树马齿苋 (*P. afra*) 的幼苗均购于花鸟市场, 于土中培养 1 周后, 选取生长情况相近的幼苗进行试验。供试土壤采于安徽师范大学后山山坡处。土壤为黄棕壤, pH = 5.33, 电导率为  $101 \mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$ , 氮磷钾和有机质的总量分别为  $1.55$ 、 $2.06$ 、 $9.69 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $25.55 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。土壤采回后风干, 过 3mm 筛后充分混匀备用。

本实验采用直径为 12.5cm 的塑料花盆, 每盆装土 250g。试验设置 0 (CK)、5、10、50、100  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  5 个  $\text{CdCl}_2$  处理浓度 (以纯  $\text{Cd}^{2+}$  计)。将其稳定两周后, 每盆栽培两株观赏植物进行实验。以上每种处理均设 3 个重复。

### 1.2 取样和测定

培养 50d 后, 分别将 3 种植物小心连根取出, 轻轻除去根部土壤, 自来水冲洗后用滤纸吸干。用剪刀将根和地上部分分开, 分别测量植株的根长、地上部分长、根鲜重、地上部分鲜重, 计算耐性指数, 并在植物加混酸消化前测其根和地上部分的干重。取成熟的鲜叶片进行生理指标的测定, 叶绿素含量采用分光光度法测定; 细胞膜透性 (电导率) 用 DDS-11A 型电导率仪测定;  $\text{O}_2^-$  产生速率采用赵世杰的方法<sup>[8]</sup>。丙二醛 (MDA) 含量采用林植芳的硫代巴比妥法测定<sup>[9]</sup>。植物体内镉含量则是将根和地上部分分开,  $105^\circ\text{C}$  杀青半小时,  $75^\circ\text{C}$  过

夜,将磨碎过筛后的植物样本用混酸(浓  $\text{HNO}_3$ :  $\text{HClO}_4$ : 浓  $\text{H}_2\text{SO}_4 = 8:1:1$ )隔夜消化,采用日本岛津 AA6800 型原子吸收分光光度计测定植物体内的 Cd 含量。

### 1.3 数据处理

耐性指数(Tolerance index)(%) = 各处理组根的平均长度  $\times 100$  / 对照组根系平均长度<sup>[10]</sup>

富集系数(Accumulator factor) = 植物地上或地下部分重金属含量 / 土壤中重金属含量<sup>[11]</sup>

转运系数(Translocation factor) = 地上部分的金属含量 / 根中的金属含量<sup>[12]</sup>

采用 Microsoft Excel 和 SPSS 统计分析软件进行数据处理与分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 Cd 对 4 种植物生长的影响

从表 1 可以看出:随着 Cd 胁迫浓度的升高,含羞草的根长、白雪姬的根长和地上部分长度均先有所上升继而下降,在  $5\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  时达到最大值,分别为对照的 1.11、1.003 倍和 1.08 倍;含羞草的根鲜重和地上部分干重同样表现出先上升后下降的趋势,并在  $10\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  时达到峰值,分别为对照的 1.11 倍和 1.05 倍;含羞草和白雪姬的其他指标以及树马齿苋的全部生长指标均随着 Cd 浓度的上升而下降。对各植物在不同浓度下的生长指标进行多重比较发现:含羞草的大多数生长指标在  $50\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  时才与对照有明显差异,其中,根长在各浓度处理下均无明显差异;白雪姬和树马齿苋的大部分生长指标则在  $10\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  时即与对照组有明显差异,其中,树马齿苋的地上部分干重在  $5\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  时就与对照有明显差异。

在重金属胁迫环境下,植物根系是最先接触重金属的部位,可以对重金属进行吸收或排斥。敏感植物在重金属胁迫下,会抑制根系的生长,导致植物生长缓慢、生物量小,而耐性植物则没有影响或影响较小,因此根系耐性指数是用来反映植物体对重金属耐性大小的一个非常重要的指标<sup>[13]</sup>。分别计算 3 种植物在不同 Cd 浓度下的耐性指数发现:随着 Cd 浓度的升高,含羞草和白雪姬的耐性指数均先上升后下降,在  $5\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  时达到峰值,并且在 Cd 浓度低于  $100\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  时,含羞草的耐性指数均大于 100;树马齿苋的耐性系数则随着 Cd 浓度的上升而不断下降,相关系数为  $-0.956^*$  (\* 显著相关, \*\* 极显著相关),呈显著负相关。含羞草、白雪姬和树马齿苋的平均耐性指数分别为 105.57、81.35 和 79.88,可见 3 种观赏植物耐性指数的大小顺序为含羞草 > 白雪姬 > 树马齿苋。

表 1 3 种观赏植物的生长指标

Table 1 The growth indexes of three kinds of ornamental under Cd stress

| 植物<br>Plants           | Cd 浓度<br>/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) | 根长<br>/cm          | 地上部分长<br>/cm      | 根鲜重<br>/( $\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$ ) | 地上部分鲜重<br>/( $\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$ ) | 根干重<br>/( $\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$ ) | 地上部分干重<br>/( $\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$ ) | 耐性指数<br>/% |
|------------------------|----------------------------------------------|--------------------|-------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------|------------|
| 含羞草                    | CK                                           | $10.38 \pm 0.85^a$ | $9.25 \pm 0.87^a$ | $2.85 \pm 0.49^a$                        | $2.57 \pm 0.37^a$                           | $1.56 \pm 0.15^a$                        | $1.68 \pm 0.09^a$                           | 100.00     |
| <i>M. pudica</i>       | 5                                            | $11.57 \pm 0.85^a$ | $8.72 \pm 0.68^a$ | $3.09 \pm 0.40^a$                        | $2.40 \pm 0.48^a$                           | $1.45 \pm 0.11^a$                        | $1.72 \pm 0.11^a$                           | 111.40     |
|                        | 10                                           | $11.50 \pm 1.06^a$ | $8.62 \pm 0.58^a$ | $3.15 \pm 0.40^a$                        | $2.17 \pm 0.27^a$                           | $1.08 \pm 0.17^b$                        | $1.76 \pm 0.10^a$                           | 110.77     |
|                        | 50                                           | $11.12 \pm 0.93^a$ | $5.63 \pm 0.40^b$ | $1.94 \pm 0.22^b$                        | $1.43 \pm 0.41^b$                           | $0.87 \pm 0.09^{bc}$                     | $1.14 \pm 0.17^b$                           | 107.13     |
|                        | 100                                          | $10.29 \pm 0.66^a$ | $4.01 \pm 0.02^c$ | $1.34 \pm 0.18^b$                        | $1.03 \pm 0.13^b$                           | $0.69 \pm 0.08^c$                        | $0.74 \pm 0.05^c$                           | 99.10      |
| 白雪姬                    | CK                                           | $3.02 \pm 0.16^a$  | $8.15 \pm 0.24^b$ | $1.83 \pm 0.15^a$                        | $4.79 \pm 0.57^a$                           | $0.73 \pm 0.08^a$                        | $3.53 \pm 0.14^a$                           | 100.00     |
| <i>T. sillamontana</i> | 5                                            | $3.03 \pm 0.51^a$  | $8.79 \pm 0.30^a$ | $1.81 \pm 0.11^a$                        | $4.32 \pm 0.61^{ab}$                        | $0.70 \pm 0.12^a$                        | $2.98 \pm 0.10^a$                           | 100.33     |
|                        | 10                                           | $2.86 \pm 0.17^a$  | $8.22 \pm 0.23^b$ | $1.50 \pm 0.12^b$                        | $3.86 \pm 0.13^{bc}$                        | $0.68 \pm 0.06^a$                        | $2.80 \pm 0.20^a$                           | 94.43      |
|                        | 50                                           | $2.19 \pm 0.08^b$  | $7.97 \pm 0.39^b$ | $1.42 \pm 0.16^{bc}$                     | $3.56 \pm 0.24^{bc}$                        | $0.63 \pm 0.04^b$                        | $2.60 \pm 0.28^{ab}$                        | 72.33      |
|                        | 100                                          | $1.19 \pm 0.16^c$  | $7.26 \pm 0.17^c$ | $1.22 \pm 0.10^c$                        | $3.42 \pm 0.42^c$                           | $0.49 \pm 0.08^b$                        | $2.17 \pm 0.39^b$                           | 39.31      |
| 树马齿苋                   | CK                                           | $5.79 \pm 0.40^a$  | $5.77 \pm 0.20^a$ | $1.32 \pm 0.14^a$                        | $4.96 \pm 0.37^a$                           | $0.68 \pm 0.10^a$                        | $2.75 \pm 0.29^a$                           | 100.00     |
| <i>P. afra</i>         | 5                                            | $5.54 \pm 0.22^a$  | $5.20 \pm 0.49^a$ | $1.31 \pm 0.12^a$                        | $4.19 \pm 0.45^b$                           | $0.65 \pm 0.10^a$                        | $2.58 \pm 0.15^{ab}$                        | 95.78      |
|                        | 10                                           | $4.66 \pm 0.57^b$  | $4.80 \pm 0.58^b$ | $1.27 \pm 0.18^a$                        | $2.60 \pm 0.49^c$                           | $0.61 \pm 0.08^a$                        | $2.51 \pm 0.10^b$                           | 80.42      |
|                        | 50                                           | $4.20 \pm 0.20^b$  | $4.33 \pm 0.47^b$ | $0.45 \pm 0.08^b$                        | $1.00 \pm 0.14^d$                           | $0.21 \pm 0.04^b$                        | $0.63 \pm 0.04^c$                           | 72.55      |
|                        | 100                                          | $2.93 \pm 0.31^c$  | $2.67 \pm 0.47^c$ | $0.23 \pm 0.04^c$                        | $0.63 \pm 0.06^d$                           | $0.11 \pm 0.02^b$                        | $0.45 \pm 0.05^c$                           | 50.67      |

注:表中数据为平均值  $\pm$  标准差,同一列中的不同字母表示显著性差异( $P < 0.05$ )

## 2.2 Cd 对 3 种植物生理指标的影响

### 2.2.1 Cd 对 3 种植物光合色素含量的影响

光合色素是作物光合作用的物质基础,其含量高低是判定植物光合作用强弱的一个重要生理指标<sup>[14]</sup>。从表 2 可以看出:随着 Cd 浓度的上升,含羞草和树马齿苋的叶绿素 a、b 的含量均先上升然后下降。含羞草的叶绿素 a、b 含量在  $10\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  时达到峰值,分别为对照的 1.26 倍和 1.09 倍,在最大胁迫浓度  $100\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  时分别为对照的 83.74% 和 69.83%;树马齿苋的叶绿素 a、b 的含量则在  $5\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  时达到峰值,分别为对照的 1.06 倍和 1.05 倍,在  $100\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  时分别为对照的 60.64% 和 51.26%;白雪姬的叶绿素 a、b 的含量则随着 Cd 胁迫的加重而不断下降,在  $100\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  时其叶绿素 a、b 的含量分别为对照的 69.34% 和 60.82%。三者类胡萝卜素含量的变化趋势与叶绿素有较大差异,随着 Cd 浓度的上升,除含羞草的类胡萝卜素含量先升后降外,白雪姬和树马齿苋的类胡萝卜素均则随着 Cd 浓度的上升而升高,相关系数分别为 0.959\*\* 和 0.959\*\*,并在  $50\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  时与对照组差异明显。

分别计算类胡萝卜素占总色素的百分比和各植物在不同处理下叶绿素 a 和 b 的比值发现:随着 Cd 添加浓度的上升,类胡萝卜素的百分比和 a/b 值(叶绿素 a 与 b 的比值)均呈现出上升的趋势,在  $100\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  浓度下含羞草、白雪姬和树马齿苋中类胡萝卜素的百分比值分别为对照的 1.11、3.99 倍和 5.52 倍,a/b 值则分别为对照的 1.20、1.14 倍和 1.18 倍。这表明在 Cd 胁迫条件下,叶绿素 a 受破坏程度可能低于叶绿素 b,类胡萝卜素几乎没有受到破坏。

表 2 Cd 对 3 种植物的光合色素含量的影响

Table 2 Effects on the content of photosynthetic pigment in three kinds of ornamental under Cd stress

| 植物<br>Plants           | Cd 浓度<br>/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) | 叶绿素 a<br>chlorophyll a<br>/( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{FW}$ ) | 叶绿素 b<br>chlorophyll b<br>/( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{FW}$ ) | 类胡萝卜素<br>Carotenoid<br>/( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{FW}$ ) | 类胡萝卜素的百分比<br>Carotencid percentage | 叶绿素 a/叶绿素 b<br>Chl a/Chl b |
|------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|----------------------------|
| 含羞草                    | CK                                           | $7.09 \pm 1.19^b$                                                          | $3.97 \pm 0.06^a$                                                          | $1.10 \pm 0.40^b$                                                       | $8.90 \pm 2.20^a$                  | $1.79 \pm 0.33^b$          |
| <i>M. pudica</i>       | 5                                            | $7.79 \pm 0.74^b$                                                          | $4.35 \pm 0.12^a$                                                          | $1.24 \pm 0.22^{ab}$                                                    | $9.45 \pm 1.01^a$                  | $1.93 \pm 0.14^b$          |
|                        | 10                                           | $8.94 \pm 0.77^a$                                                          | $4.35 \pm 0.57^a$                                                          | $1.41 \pm 0.06^a$                                                       | $9.67 \pm 0.99^a$                  | $2.06 \pm 0.10^b$          |
|                        | 50                                           | $6.76 \pm 0.19^{bc}$                                                       | $3.26 \pm 0.32^b$                                                          | $1.09 \pm 0.05^b$                                                       | $9.78 \pm 0.13^a$                  | $2.08 \pm 0.15^b$          |
|                        | 100                                          | $5.94 \pm 0.25^c$                                                          | $2.78 \pm 0.23^b$                                                          | $0.95 \pm 0.06^b$                                                       | $9.86 \pm 0.08^a$                  | $2.14 \pm 0.08^a$          |
| 白雪姬                    | CK                                           | $5.55 \pm 1.00^a$                                                          | $5.04 \pm 1.05^a$                                                          | $0.17 \pm 0.04^a$                                                       | $1.62 \pm 0.30^b$                  | $1.11 \pm 0.10^a$          |
| <i>T. sillamontana</i> | 5                                            | $5.50 \pm 0.45^a$                                                          | $4.62 \pm 0.37^{ab}$                                                       | $0.22 \pm 0.10^a$                                                       | $2.14 \pm 0.92^b$                  | $1.19 \pm 0.01^a$          |
|                        | 10                                           | $5.30 \pm 0.80^a$                                                          | $4.49 \pm 0.56^{ab}$                                                       | $0.25 \pm 0.07^a$                                                       | $2.48 \pm 0.65^{ab}$               | $1.19 \pm 0.21^a$          |
|                        | 50                                           | $4.59 \pm 0.79^{ab}$                                                       | $3.27 \pm 0.92^{bc}$                                                       | $0.41 \pm 0.07^b$                                                       | $5.13 \pm 1.47^a$                  | $1.45 \pm 0.27^a$          |
|                        | 100                                          | $3.85 \pm 0.44^b$                                                          | $3.07 \pm 0.79^c$                                                          | $0.48 \pm 0.11^b$                                                       | $6.57 \pm 1.95^a$                  | $1.31 \pm 0.40^a$          |
| 树马齿苋                   | CK                                           | $4.51 \pm 0.28^a$                                                          | $3.39 \pm 0.30^a$                                                          | $0.16 \pm 0.08^a$                                                       | $2.05 \pm 1.12^d$                  | $1.33 \pm 0.04^b$          |
| <i>P. afra</i>         | 5                                            | $4.80 \pm 0.07^a$                                                          | $3.56 \pm 0.50^a$                                                          | $0.25 \pm 0.08^a$                                                       | $2.97 \pm 1.15^{cd}$               | $1.36 \pm 0.18^b$          |
|                        | 10                                           | $3.75 \pm 0.08^b$                                                          | $2.79 \pm 0.10^b$                                                          | $0.26 \pm 0.07^a$                                                       | $3.88 \pm 1.10^c$                  | $1.35 \pm 0.06^b$          |
|                        | 50                                           | $3.30 \pm 0.16^c$                                                          | $2.26 \pm 0.10^c$                                                          | $0.40 \pm 0.02^b$                                                       | $6.70 \pm 0.66^b$                  | $1.46 \pm 0.01^b$          |
|                        | 100                                          | $2.73 \pm 0.29^d$                                                          | $1.74 \pm 0.17^d$                                                          | $0.49 \pm 0.05^b$                                                       | $9.88 \pm 0.09^a$                  | $1.57 \pm 0.01^a$          |

注:表中数据为平均值  $\pm$  标准差,同一列中的不同字母表示显著性差异( $P < 0.05$ )

### 2.2.2 Cd 对 3 种植物电导率的影响

细胞膜透性调节细胞内外物质的交换运输,是评定植物对污染物反应的指标之一。重金属与细胞膜成分相结合,造成膜蛋白的磷脂结构改变,破坏细胞膜系统使选择性降低透性增大,细胞内一些可溶物质外渗,从而电导率升高<sup>[15]</sup>。由图 1 可知:随着 Cd 添加浓度的升高,3 种植物的电导率均随之上升,且与 Cd 添加浓度显著正相关,含羞草、白雪姬和树马齿苋与 Cd 浓度之间的相关系数分别为 0.940\*、0.962\*\* 和 0.946\*。含羞草、白雪姬和树马齿苋的电导率分别平均上升了 22.75%、43.78% 和 31.02%,当 Cd 浓度达到最大添加浓度  $100\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  时,含羞草、白雪姬和树马齿苋的电导率分别为对照的 1.39、1.81 和 1.56 倍。白雪姬的电导率受

Cd 污染的影响程度最大,树马齿苋次之,含羞草的电导率受 Cd 污染的影响的程度最小。

### 2.2.3 Cd 对 3 种植物 $O_2^{\cdot-}$ 离子产生速度的影响

由图 2 可以看出,不同植物在正常生长条件下  $O_2^{\cdot-}$  (超氧阴离子) 产生水平存在明显的差异;含羞草、白雪姬和树马齿苋的  $O_2^{\cdot-}$  离子产生速度均随着 Cd 浓度的上升而升高,并与 Cd 浓度极显著正相关,相关系数分别为 0.981\*\*、0.979\*\* 和 0.983\*\*。在 Cd 浓度低于  $50\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  时,含羞草、白雪姬和树马齿苋的  $O_2^{\cdot-}$  产生速度分别平均上升了 6.32%、17.51% 和 18.8%,而在  $50-100\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  Cd 浓度间,含羞草、白雪姬和树马齿苋的  $O_2^{\cdot-}$  产生速度分别平均上升了 32.5%、60.79% 和 70.2%。这说明在 Cd 胁迫浓度较低时,植物体内的  $O_2^{\cdot-}$  产生速度增加较慢,而当 Cd 浓度增加到一定水平时,  $O_2^{\cdot-}$  产生速度会快速上升。且在 3 种植物中,含羞草的  $O_2^{\cdot-}$  产生速度升高的最慢,树马齿苋和白雪姬则上升较快。

### 2.2.4 Cd 对 3 种植物 MDA 含量的影响

MDA(丙二醛)可与蛋白质,核酸,氨基酸等活性物质交联,形成脂褐素,干扰细胞的正常生命活动,是反应膜质过氧化水平的一个指标<sup>[16-17]</sup>。从图 2 可以看出 3 种植物的 MDA 含量均随着 Cd 浓度的上升而表现出上升的趋势,且与 Cd 浓度极显著正相关,含羞草、白雪姬和树马齿苋与 Cd 浓度之间的相关系数分别为 0.985\*\*、0.963\*\* 和 0.993\*\*。在  $0-100\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  Cd 浓度之间,含羞草、白雪姬和树马齿苋分别平均上升了 16.19%、30.87% 和 24.06%。且在各 Cd 处理浓度下,MDA 的上升幅度总是白雪姬 > 树马齿苋 > 含羞草。MDA 含量增加表示细胞膜质过氧化水平高,膜结构受损伤程度加深,植物的抗逆性减弱<sup>[18]</sup>。因此,从 MDA 方面来看,含羞草对重金属 Cd 的耐受性最高,树马齿苋次之,白雪姬对重金属 Cd 的耐受性最低。

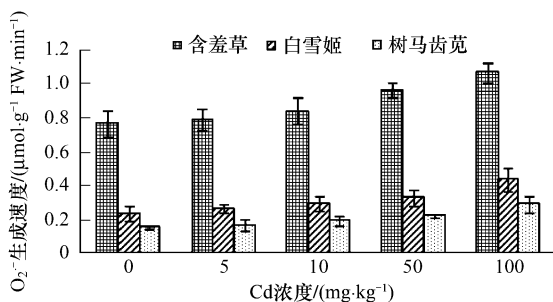


图 2 Cd 胁迫对 3 种植物  $O_2^{\cdot-}$  生成速度的影响

Fig. 2 Effects on the production rate of superoxide ( $O_2^{\cdot-}$ ) in three kinds of ornamental under Cd stress

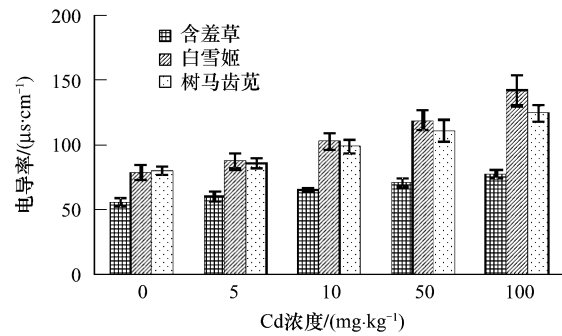


图 1 Cd 胁迫对 3 种植物电导率的影响

Fig. 1 Effects on the conductivity of three kinds of ornamental under Cd stress

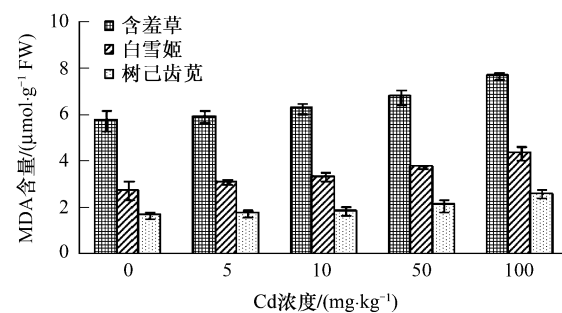


图 3 Cd 胁迫对 3 种植物 MDA 含量的影响

Fig. 3 Effects on the content of MDA in three kinds of ornamental under Cd stress

### 2.3 Cd 在 3 种植物体内的积累和分布情况

随着 Cd 浓度的上升,3 种观赏植物根系和地上部分的 Cd 累积浓度均明显升高。其中树马齿苋体内 Cd 的累积浓度最高,在  $10\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  下根系 Cd 累积浓度就超过了  $100\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,在最高胁迫浓度  $100\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  下其根和地上部分的 Cd 累积浓度分别高达  $621.37\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $359.47\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。含羞草体内的 Cd 累积浓度次之,当 Cd 浓度大于  $10\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  时,根系和地上部分 Cd 的累积浓度均高于白雪姬,且在  $50\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  时根和地上部分的累积浓度均超  $100\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,分别为  $224.25\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $136.80\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。白雪姬的 Cd 累积浓度最低,根系 Cd 累积浓度在  $50\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  时达到  $194.59\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,地上部分的 Cd 累积浓度在添加浓度为  $100\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  时超过

$100\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 为  $152.5\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

植物对重金属的吸收分布情况是耐性物种选择的重要的指标,富集系数反映植物对重金属的富集能力,转运系数能反映出重金属在植物体内的运输和分配情况<sup>[19-20]</sup>。含羞草、白雪姬和树马齿苋根系和地上部分的富集系数平均值分别为 5.80、3.26;5.17、2.86 和 10.87、5.39。表明对 Cd 累积能力的高低顺序为树马齿苋 > 含羞草 > 白雪姬。含羞草、白雪姬和树马齿苋的转运系数的平均值分别为 0.57、0.53 和 0.47,且在 Cd 浓度大于  $5\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  时,含羞草转运系数显著高于白雪姬和树马齿苋,这表明含羞草在较高浓度下转运系数仍保持在较高的水平,能将吸收的较多的运输到地上部位,体内可能存在较好的运输和解毒机制以应对重金属 Cd 的胁迫。白雪姬和树马齿苋这方面的能力则相对较弱。

表 3 Cd 在 3 种植物体内的积累和分布情况

Table 3 Cd Concentration and distributing in three kinds of ornamental under Cd stress

| 植物<br>Plants           | Cd 浓度<br>Cd concentration<br>/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) | 根积累浓度<br>Concentration of root<br>/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) | 地上部分积累浓度<br>Concentration of<br>above ground parts<br>/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) | 转运系数<br>Translocation<br>factor | 富集系数 Accumulator factor |                               |
|------------------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-------------------------|-------------------------------|
|                        |                                                                  |                                                                       |                                                                                           |                                 | 根<br>Root               | 地上部分<br>Above ground<br>parts |
| 含羞草                    | CK                                                               | $6.25 \pm 0.40^{\text{d}}$                                            | $3.48 \pm 0.17^{\text{c}}$                                                                | $0.56 \pm 0.01^{\text{b}}$      | 9.94                    | 5.53                          |
| <i>M. pudica</i>       | 5                                                                | $27.55 \pm 4.71^{\text{cd}}$                                          | $12.43 \pm 1.65^{\text{c}}$                                                               | $0.45 \pm 0.02^{\text{c}}$      | 5.51                    | 2.49                          |
|                        | 10                                                               | $44.35 \pm 6.49^{\text{c}}$                                           | $27.50 \pm 4.41^{\text{c}}$                                                               | $0.62 \pm 0.01^{\text{a}}$      | 4.44                    | 2.75                          |
|                        | 50                                                               | $224.25 \pm 8.26^{\text{b}}$                                          | $136.80 \pm 9.56^{\text{b}}$                                                              | $0.61 \pm 0.02^{\text{a}}$      | 4.49                    | 2.73                          |
|                        | 100                                                              | $460.00 \pm 24.75^{\text{a}}$                                         | $277.75 \pm 24.00^{\text{a}}$                                                             | $0.60 \pm 0.02^{\text{a}}$      | 4.60                    | 2.78                          |
|                        | CK                                                               | $4.36 \pm 0.54^{\text{d}}$                                            | $3.08 \pm 0.44^{\text{d}}$                                                                | $0.71 \pm 0.01^{\text{a}}$      | 6.93                    | 4.89                          |
| <i>T. sillamontana</i> | 5                                                                | $31.50 \pm 4.92^{\text{cd}}$                                          | $16.58 \pm 1.94^{\text{cd}}$                                                              | $0.53 \pm 0.02^{\text{b}}$      | 6.30                    | 3.31                          |
|                        | 10                                                               | $50.35 \pm 4.04^{\text{c}}$                                           | $28.30 \pm 2.45^{\text{c}}$                                                               | $0.56 \pm 0.00^{\text{b}}$      | 5.03                    | 2.83                          |
|                        | 50                                                               | $194.59 \pm 8.17^{\text{b}}$                                          | $86.00 \pm 10.47^{\text{b}}$                                                              | $0.44 \pm 0.04^{\text{c}}$      | 3.89                    | 1.72                          |
|                        | 100                                                              | $369.64 \pm 27.29^{\text{a}}$                                         | $152.50 \pm 11.96^{\text{a}}$                                                             | $0.41 \pm 0.00^{\text{d}}$      | 3.70                    | 1.53                          |
|                        | CK                                                               | $9.10 \pm 0.69^{\text{c}}$                                            | $6.95 \pm 0.82^{\text{d}}$                                                                | $0.76 \pm 0.03^{\text{a}}$      | 14.49                   | 11.06                         |
| <i>P. afra</i>         | 5                                                                | $64.73 \pm 4.40^{\text{d}}$                                           | $24.65 \pm 3.30^{\text{d}}$                                                               | $0.38 \pm 0.03^{\text{b}}$      | 12.95                   | 4.93                          |
|                        | 10                                                               | $133.62 \pm 5.36^{\text{c}}$                                          | $54.20 \pm 2.80^{\text{c}}$                                                               | $0.41 \pm 0.00^{\text{b}}$      | 13.36                   | 5.42                          |
|                        | 50                                                               | $372.25 \pm 11.43^{\text{b}}$                                         | $146.82 \pm 14.00^{\text{b}}$                                                             | $0.39 \pm 0.03^{\text{b}}$      | 7.44                    | 2.94                          |
|                        | 100                                                              | $612.37 \pm 22.75^{\text{a}}$                                         | $259.47 \pm 15.06^{\text{a}}$                                                             | $0.42 \pm 0.01^{\text{b}}$      | 6.12                    | 2.59                          |

注:表中数据为平均值  $\pm$  标准差,同一列中的不同字母表示显著性差异 ( $P < 0.05$ )

### 3 结果与讨论

重金属影响植物根尖细胞有丝分裂,造成细胞分裂速度减慢,并通过改变植物的生理生化过程而影响其生长发育<sup>[21-22]</sup>。在本实验中,含羞草、白雪姬和树马齿苋的生长均受到不同程度的影响,可能的原因是 Cd 与 Ca 竞争,影响 Ca 调素的活性进而影响细胞分裂。同时,Cd 能与带负电的核酸结合,破坏核仁结构抑制 DNase 和 RNase 活性,并使植物体 DNA 合成受阻,产生 C-有丝分裂、染色体断裂、畸变、粘连和液化,进而影响植物的生长发育。在前人研究中菖蒲 (*Acorus calamus*) 和鸡冠菜 (*Meristotheca papulosa*) 的平均耐性指数分别为 59 和 52.6<sup>[23-24]</sup>,而含羞草、白雪姬和树马齿苋的平均耐性指数分别为 105.57、81.35 和 79.88,这表明本文选取的 3 种观赏植物均对 Cd 有较强的耐性。

光合器官是植物出现病害症状的最敏感部位。在 Cd 胁迫下,3 种植物叶绿素含量均有不同程度的下降,受破坏的程度为含羞草 < 白雪姬 < 树马齿苋;类胡萝卜素所占的百分比和叶绿素 a/b 值却随着 Cd 浓度的上升而升高。逆境胁迫下叶绿素含量下降的主要原因是叶绿体片层中捕光 Chlalb-Pro 复合体合成受到抑制。 $\text{Cd}^{2+}$  可能与叶绿素合成相关酶(原叶绿素脂还原酶、 $\delta$ -氨基乙酰丙酸合成酶和胆色素原脱氨酶)的肽链中富含 SH 的部分结合,抑制了酶活性从而阻碍了叶绿素的合成<sup>[25]</sup>。同时,在光合作用的过程中,叶绿素 b 主要进行光能的收集,叶绿素 a 主要起到将光能进行转化的作用,而类胡萝卜素可保护叶绿素分子免遭光氧化损伤。

叶绿素 a/b 值越高,则植物对光能的利用效率越高。因此,在 Cd 胁迫造成叶绿素含量下降的情况下,植物可能通过提高类胡萝卜素的比例和叶绿素 a/b 值的途径提高光能利用效率来维持自身的生长。植物细胞膜系统是植物细胞和外界环境进行物质交换和信息交流的界面和屏障,其稳定性是细胞进行正常生理功能的基础。在 Cd 的胁迫下,活性氧产生和清除的代谢系统失调,活性氧和自由基在体内过量累积,造成膜脂过氧化,MDA 含量升高。同时,Cd 直接与膜蛋白的 -SH 结合或与磷酸乙醇胺和单分子层的磷脂线氨酸反应,破坏了细胞质膜的结构和功能<sup>[26]</sup>,使细胞膜的选择性降低电导率升高。在本实验中,3 种观赏植物的  $O_2^{\cdot-}$  生成速度、MDA 含量和电导率均随着 Cd 添加浓度的上升表现出上升趋势,且变化的显著性顺序为含羞草 < 树马齿苋 < 白雪姬。

重金属累积能力的大小是修复物种选择的一个重要指标。超累积植物龙葵在  $25\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  镉浓度下茎叶镉累积量分别为  $103.8\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $124.6\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ <sup>[27]</sup>,但大多数累积植物累积量均较低。李福燕发现在 Cd 浓度为  $100\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  时,剑麻 (*Aagave sisalana*) 的根和地上部分中重金属 Cd 的累积浓度分别为  $133.6\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $55.86\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。Han 发现 *Iris lactea* var. *chinensis* 的根和地上部分在  $20\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时对重金属 Cd 的累积浓度分别为  $389.19\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $241.18\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。而在严明理的研究中:在 Cd 浓度为  $50\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  时,羽叶鬼针草 (*Bidens maximowicziana*) 的根和地上部分中重金属 Cd 的累积浓度分别为  $87.1\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $89.2\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;美洲商陆 (*Phytolacca americana*) 的根和地上部分中重金属 Cd 的累积浓度分别为  $78.10\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $79.2\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;紫叶芥菜 (*Brassica juncea*) 的根和地上部分中重金属 Cd 的累积浓度分别为  $79.1\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $78.2\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。Eun 研究的 *Juniperus monosperma* 累积量更低<sup>[13,28-30]</sup>。与这些研究相比,虽然与超累积植物存在一定的差距,含羞草、白雪姬和树马齿苋在  $50\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  时,除白雪姬的地上部分外 Cd 的累积浓度均高于  $130\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,树马齿苋根和地上部分的累积浓度已分别达到了  $372.25\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $146.2\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。这表明含羞草、白雪姬和树马齿苋均对重金属 Cd 均具有较强的累积能力,且对 Cd 累积能力的大小为树马齿苋 > 含羞草 > 白雪姬。而从转运系数的大小可以看出,将 Cd 转移到地上部分的能力是含羞草 > 白雪姬 > 树马齿苋。

由以上分析可知:含羞草受 Cd 的影响最小,耐性最强,白雪姬次之,树马齿苋最低;在重金属的吸收累积方面,3 种观赏植物对重金属 Cd 均有较强的累积能力,其中树马齿苋的累积能力最强,含羞草和白雪姬次之,且含羞草的位移系数在高浓度下也能保持较高的水平,体内可能存在较好的运输和解毒机制。这说明,含羞草对重金属 Cd 具有最高的耐性和较强的累积能力,适合用于重金属 Cd 污染土壤的修复和治理;而白雪姬和树马齿苋虽然耐性相对较低,却对 Cd 有较强的累积能力,因此可以作为在较低 Cd 污染土壤上生长的经济作物,在治理土壤 Cd 污染的同时创造经济效益。

## References:

- [ 1 ] Gupta U C, Gupta S C. Trace element toxicity relationships to crop production and livestock and human health: Implications for management. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1998, 29: 1491-1522.
- [ 2 ] Sanita D I, Toppi L, Gabbriel L I R. Response to cadmium in higher plants. *Environmental and Experimental Botany*, 1999, 41: 105-130.
- [ 3 ] Wu F B, Zhang G P. Genotype variation in kernel heavy metal concentrations in barley and as affected by soil factors. *Journal of Plant Nutrition*, 2002, 25: 1163-1173.
- [ 4 ] Song B, Chen T B, Zheng Y M, Huang Z C, Zheng G D, Luo J F. A survey of cadmium concentrations in vegetables and soils in Beijing and the potential risks to human health. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(8): 1343-1353.
- [ 5 ] Cao H C, Wang J D, Ren H M, Zhao W, Zhang X L. Ecotoxicity assessment of cadmium in soil tomaize (*Zeamays*) and soybean (*Glycinemax*). *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(2): 298-303.
- [ 6 ] Zhou Q X, Wei S H, Diao C Y. Basic principles and researching progresses in ecological remediation of contaminated soils. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(2): 419-424.
- [ 7 ] Wang Q R, Cui Y S, Dong Y T. Phytoremediation — An effective approach of heavy metal cleanup from contaminated soil. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(2): 326-327.
- [ 8 ] Zhao S J, Shi G A, Dong X C. *Laboratory Guide for Plant Physiology*. Beijing: China Agriculture Science and Technology Press, 1998: 55-71.
- [ 9 ] Lin Z F, Li S S, Lin G Z, Guo J Y. The accumulation of hydrogen peroxide in senescencing leaves and chloroplasts in relation to lipid peroxidation. *Acta Phytophysiological Sinica*, 1988, 14(1): 16-22.

- [10] Rout G R, Samantaray S, Das P. Differential cadmium tolerance of mung bean and rice cultivars in hydroponic culture. *Acta Agriculturae Scandinavica*, Sect B, 1999, 49(4): 234-241.
- [11] Chamberlain A C. Fallout of lead and uptake by crops. *Atmospheric Environment*, 1983, 17: 693-706.
- [12] Baker A J M, Reeves R D, Hajar A S M. Heavy metal accumulation and tolerance in British populations of the metallophyte *Thlaspi caerulescens* J. & C. Presl. (*Brassicaceae*). *New Phytologist*, 1994, 127: 61-68.
- [13] Yan M L, Liu L L, Wang H H, Xiang Y C, Feng T. Accumulation Characteristics of Cadmium for Three Plants in Red Soil. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2009, 28(1): 72-77.
- [14] Du T Q, Yang J Z, Hao J P, Miao G Y. Influences of multiple stress by Cd, Pb and Cr on physiological-biochemical characters of wheat seedlings. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(8): 4475-4482.
- [15] Strange J, Macbaur M R. Evidence for a role for the cell membrane in copper tolerance. *New Phytologist*, 1991, 119: 383-388.
- [16] Clijsters H, Van Assche F. Inhibition of photosynthesis by heavy metals. *Photosynthesis Research*, 1985, 7: 31-40.
- [17] Demidchik V, Sokolik A, Yurin V. The effect of  $\text{Cu}^{2+}$  in transport systems of the plant cell plasmolemma. *Plant Physiology*, 1997, 114: 1313-1325.
- [18] Panla K P, Thompson J E. Evidence for the accumulation of peroxidized lipids in membranes of senescing cotyledons. *Plant Physiology*, 1984, 75: 1152-1157.
- [19] Reeves R. D. The hyperaccumulation of nickel by serpentine plants//Gunn J M, Liange O L, Osmond B & Ziegler H eds. *Baker Vegetation of Ultramatic (Serpentine) Soil*. Andover, Hampshire, UK: Intercept Ltd. 1992: 253-277.
- [20] Monni S, Salemaa M, White C, Tuittila E & Huopalaimea M. Copper resistance of *Calluna vulgaris* originating from the pollution gradient of a Cu-Ni smelter, in south-west Finland. *Environmental Pollution*, 2000, 109: 211-219.
- [21] Romanowska E, Wróblewska B, Drozak A, Zienkiewicz M, Siedlecka M. Effect of Pb ions on superoxide dismutase and catalase activities in leaves of pea plants grown in high and low irradiance. *Biologia Plantarum*, 2008, 52: 80-86.
- [22] Seregin I V, Kozhevnikova A D. Physiological role of nickel and its toxic effects on higher plants. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2006, 53(2): 257-277.
- [23] Zhou S B, Wang C J, Yang H J, Bi D, Li J H, Wang Y. Stress responses and bioaccumulation of heavy metals by *Zizania latifolia* and *Acorus calamus*. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(1): 281-287.
- [24] Xu S Q, Cheng W D. The Cd tolerance difference in the germination and seedling growth in *Brassica campestris* and leaf mustard. *Journal of Agricultural Science*, 2005, 6: 436-438.
- [25] Somashekariah B V, Padamajae K, Prasad R K. Phytotoxicity of cadmium ions on germination seedlings of mung bean (*Phaseolus vulgaris*): Involvement of lipid peroxides in chlorophyll degradation. *Plant Physiology*, 1992, 65: 85-89.
- [26] Vallee B I, Ulmer D D. Biochemical effects of mercury, cadmium and lead. *Annual Review of Biochemistry*, 1972, 41: 91-98.
- [27] Wei S H, Zhou Q X, Wang X. Cadmium-Hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. and Its Accumulating Characteristics. *Environmental Science*, 2005, 26(3): 167-171.
- [28] Li F Y, Li S P, Li X M, Guo B, Chen L Y, Qi Z P. Study of soil remediation of sisal and lime on Cd-contaminated soil. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2007, 9: 46-49.
- [29] Han Y L, Yuan H Y, Huang S Z, Guo Z, Xia B, Gu J G. Cadmium tolerance and accumulation by two species of *Iris*. *Ecotoxicology*, 2007, 16: 557-563.
- [30] Eun W S. Cadmium Removal by *Juniperus monosperma*: the Role of Calcium Oxalate Monohydrate Structure in Bark. *Korean J. Chemical Engineering*, 2005, 22(4): 599-604.

#### 参考文献:

- [4] 宋波, 陈同斌, 郑袁明, 黄泽春, 郑国砥, 罗金发. 北京市菜地土壤和蔬菜镉含量及其健康风险分析. *环境科学学报*, 2006, 26(8): 1343-1353.
- [5] 曹会聪, 王金达, 任慧敏, 赵卫, 张学林. 土壤镉暴露对玉米和大豆的生态毒性评估. *环境科学学报*, 2007, 27(2): 298-303.
- [6] 周启星, 魏树和, 刁春燕. 污染土壤生态修复基本原理及研究进展. *农业环境科学学报*, 2007, 26(2): 419-424.
- [7] 王庆仁, 崔岩山, 董艺婷. 植物修复重金属污染土壤整治有效途径. *生态学报*, 2001, 21(2): 326-327.
- [8] 赵世杰, 史国安, 董新纯. 植物生理学实验指导. 北京: 中国农业出版社, 1998.
- [9] 林植芳, 李双顺, 林桂珠, 郭俊彦. 衰老叶片和叶绿体中  $\text{H}_2\text{O}_2$  的积累与膜脂过氧化化的关系. *植物生理学报*, 1988, 14(1): 16-22.
- [13] 严明理, 刘丽莉, 王海华, 向言词, 冯涛. 3 种植物对红壤中镉的富集特性研究. *农业环境科学学报*, 2009, 28(1): 72-77.
- [14] 杜天庆, 杨锦忠, 郝建平, 苗果园. Cd、Pb、Cr 三元胁迫对小麦幼苗生理生化特性的影响. *生态学报*, 2009, 29(8): 4475-4482.
- [23] 周守标, 王春景, 杨海军, 毕德, 李金花, 王影. 菰和菖蒲对重金属的胁迫反应及其富集能力. *生态学报*, 2007, 27(1): 281-287.
- [24] 徐素琴, 程旺大. 油菜、芥菜萌芽与幼苗生长的耐镉性差异. *浙江农业科学*, 2005, 6: 436-438.
- [27] 魏树和, 周启星, 王新. 超积累植物龙葵及其对镉的富集特征. *环境科学*, 2005, 26(3): 167-171.
- [28] 李福燕, 李士平, 李许明, 郭彬, 陈柳燕, 漆智平. 剑麻与石灰对镉污染土壤修复研究. *广东农业科学*, 2007, 9: 46-49.